中高層木造建築技術に基づく一般化した設計・施工方法の提案

国土交通省 国土技術政策総合研究所 住宅研究部 住宅生産研究室長 荒木 康弘

1. はじめに

2050年カーボンニュートラルの実現のためには，炭素を固定する木材利用の促進が必要であり，特に，現在非木造が多くを占める中高層建築物における木材利用が重要であると考えられ，政府全体の重要課題として統合イノベーション戦略2020やバイオ戦略2020にも推進を図ると明示されている。

中高層木造建築物が普及している欧米の状況に応じて，我が国でも安全性が確保された中高層木造建築工法の開発が進み，これを踏まえた建築基準法等の規制の見直しが段階的に行われる中，「官民研究開発投資拡大プログラム（Public/Private R&D Investment Strategic Expansion PrograM：PRISM）」により設計・建設に係る要素技術を開発し建築基準に反映したところである。

これにより，高度な技術力を持つ先進企業が設計・施工できるなど一定の社会実装は実現したが，本格的な普及に向けては，設計・施工に高い技術力が必要という課題が残されている。こうした課題を解消するためには，中規模建設会社等の設計・施工能力を高め中高層木造建築技術の一般化に資するさらなる取組が必要である。

そこで，「研究開発とSociety 5.0との橋渡しプログラム（BRIDGE）」（以下，「BRIDGE」という）において，中高層木造建築物の技術の一般化により，中規模建設会社等による建設を加速し，国産材の利用促進を含めた木材サプライチェーン全体の好循環も生み出せるとして，中高層木造建築技術に基づく一般化した設計・施工方法の提案を行った。

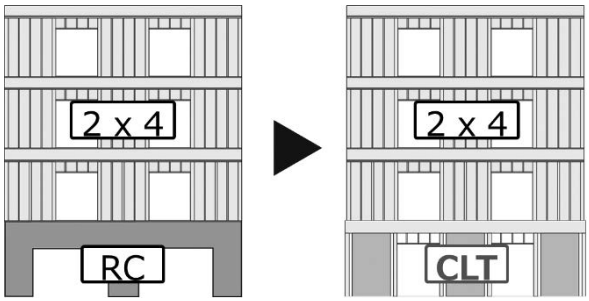
本稿では，「CLT（Cross Laminated Timber）と2×4工法の上下階混構造の設計基準案の検討」と「CLTと鉄筋コンクリート造合成床システムの開発」について紹介する。

2. CLT工法と2×4工法の上下階混構造の設計案の検討[1),2)]

枠組壁工法で4階建以上の中層建築物を建設する場合，低層階は耐震性および耐火性能の観点からRC造とすることが多い。一方，低層階をRC造とすると，コスト面や建築基準法施行令第82条の6第二号イの剛性率規定を満たすのが難しいといった問題がある。

低層階に壁倍率換算で30倍程度のCLT耐力壁を用いることができれば，剛性率規定を満たしやすくなり，かつ乾式工法のため工期短縮が可能になること，また従来の高倍率面材耐力壁よりも簡便に現場施工ができると考えられる（図－1）。

そこで，1層をCLT耐力壁，上層階を枠組壁



構造部材に木材を利用することにより，建物の安全性を確保しつつ，建設材料に占める木材使用量の割合を増加

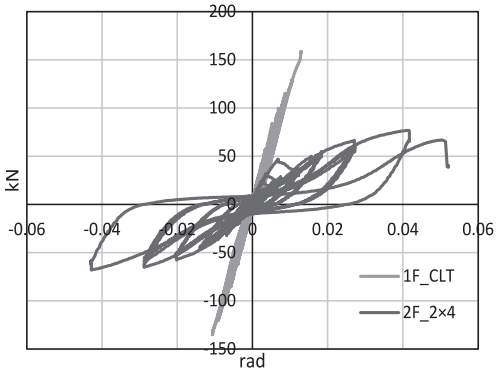
図－1　CLT 工法と 2 × 4 工法の上下階混構造の例

工法とした 4 層立面併用構造の架構システムを提案し，その構造性能を静加力実験と解析により確認した。本稿では，静加力実験の概要について述べる。

BRIDGE では CLT と 2 × 4 工法の上下階混構造の構造方法を検討した。また，施工試験を兼ねて 1 層を CLT 耐力壁，2 層を 2 × 4 工法とした試験体を製作し，その性能を実験的に確認した（**写真－1**，**図－2**）。



写真－1　CLT ＋ 2 × 4 立面混構造 2 層試験体

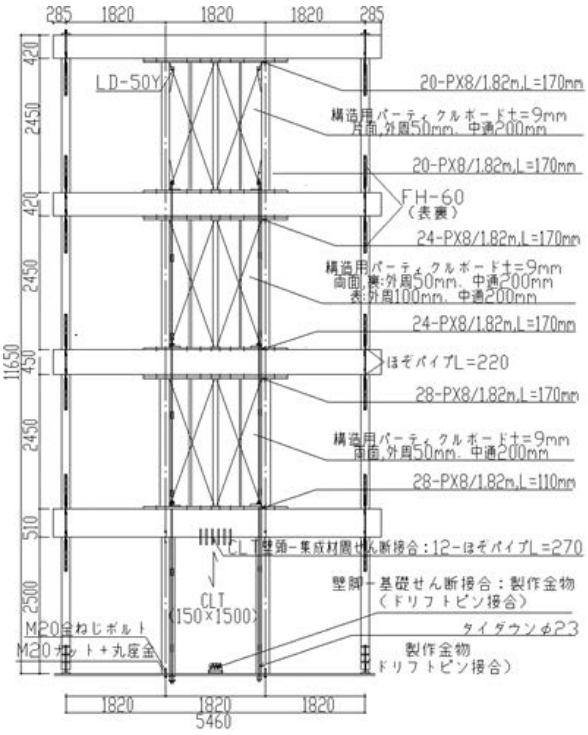


図－2　2 層実験の荷重変形関係

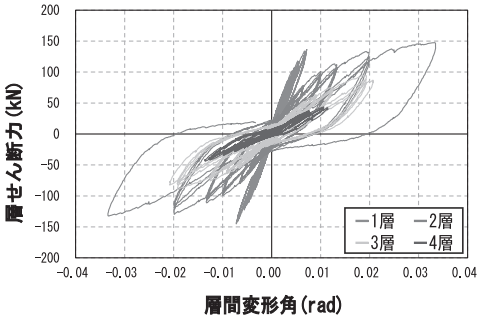
その後，林野庁事業「令和 6 年度林野庁補助事業『CLT パネル工法と枠組壁工法による中高層建築物立面混構造の合理的設計法の実用化による中高層分野の木造化推進事業』」において，実大 4 層の架構実験を行い，提案した構造システムの妥当性を検証した。

試験体は**図－3** に示す 1 階に CLT 耐力壁を配置した枠組壁工法 4 層 1 スパン架構を抽出したものである。CLT および 2 × 4 耐力壁は連層で，タイダウンで 1 ～ 3 層の引張力を負担し，4 層の柱脚引張接合部に接続する架構システムとしている。

試験体は反力床上に水平に設置し，1 階壁・柱脚部を反力壁上の基礎治具に固定した。また横架



図－3　4 層試験体図



図－4　4 層試験体の荷重変形関係

材を面外拘束装置で固定して面外方向の変形を拘束した。水平加力にはサーボ型油圧ポンプで制御された油圧ジャッキを用いて強制変位を各層に入力した。実験結果を図－4に示す。1層CLT架構は弾性的な挙動で，1層を1/100 radまで加力した際もその傾向は保持されていた。

これらの実験結果をもとに，表－1に示す低層階にCLT耐力壁を配置し，上層階に2×4架構を配置する設計法案を提案した。引張接合部は全層タイダウン，またはCLT耐力壁の階を鋼板挿入ドリフトピン接合，2×4耐力壁の階はタイダウンを想定する。

上層の2×4階が終局状態に至るまで下層のCLT階は弾性，またCLT耐力壁周辺の木質部材は構造耐力上支障のある急激な耐力の低下を生じないことを確認する。

構造計算時は図－5（左）に示す解析モデルを用いるが，図－5（右）のような，適切に耐力壁や周辺部材をモデル化した解析モデルを用いることも可能である。今後，枠組壁工法計算基準等に追加される予定である。

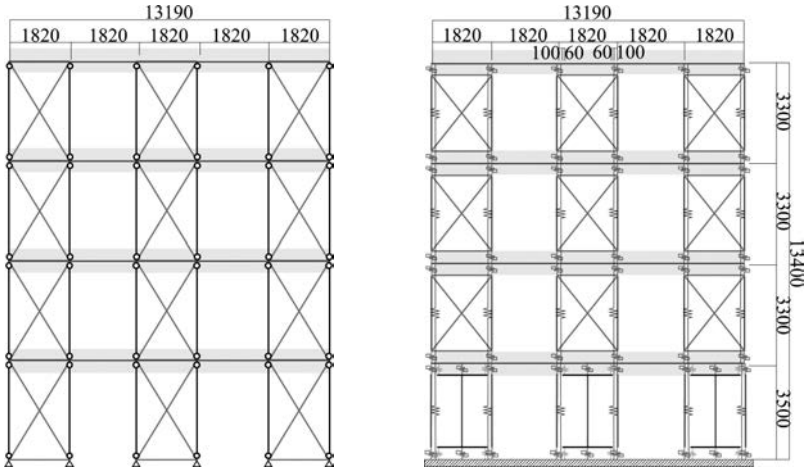
3. RC+CLT等合成床構造システムの開発[3)]

中層大型木質混構造建築物の床工法には一般的な設計法や工法がなく，耐火被覆や遮音対策のコストが高い。そのため，耐火性能がありコスト削減に資するRC+CLT等合成床構造システムの一般的な設計法・施工方法を整備する必要がある。そこで，RC+CLT合成床構造システムを開発した。

開発した合成床システムは，RCスラブを配し，金物等によって機械的接合した複合構造（Timber-Concrete Composite system，以下，「TCC」と

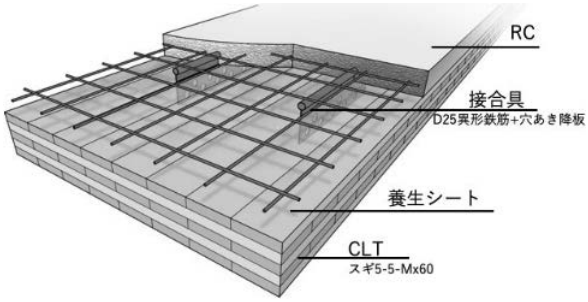
表－1　CLT＋2×4工法立面混構造の設計法案

	ルート3	ルート2
計算方法	CLT壁，2×4壁をブレース置換し，一貫計算ソフトで解析	
各層の反曲点高さ比	CLT階：1.0 2×4階：最上階は1.0，それ以外は0.6	
CLT階のモデル化	2P：壁倍率30倍相当の剛性 4P：壁倍率65倍相当の剛性	
外力の考え方・CLT耐力壁及び周辺部材の設計方法	2×4階：緑本のDs（0.3～0.35） CLT階： （案）Ds=0.55 ＋耐力壁＆周辺部材が破壊しないことを確認	2×4階：新ルート2 CLT階：Ds=0.2×1.5 （=2×4耐力壁の終局/短期）×1.5 （=安全率）=0.45でCLT耐力壁と周辺部材が短期許容応力度以下



（左）CLT&2×4耐力壁ブレース置換，（右）CLT壁エレメント置換＋2×4耐力壁ブレース置換

図－5　構造計算時の解析モデルの例

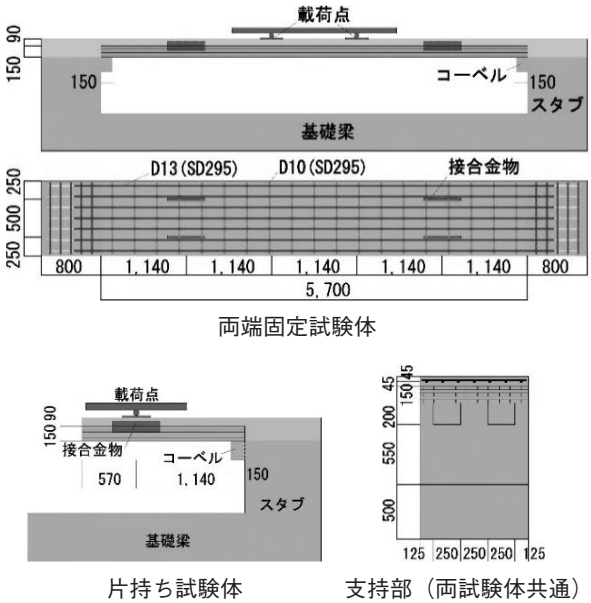


図－6　RC＋CLT 合成床構造システム

いう，図－6）である。TCC 床は基礎的研究が既に海外を中心に進められているが，既往研究はいずれも床を単純支持条件として実験的・解析的に性能評価したものである。

しかし RC 構造躯体での TCC 床の利用を想定すると，床は固定端条件となり，端部付近では床上面に引張力が生じる。そこで BRIDGE の研究課題の一つとして，より汎用的な設計法を開発するため，固定端条件での TCC 床の長期性能を実験的に確認した。

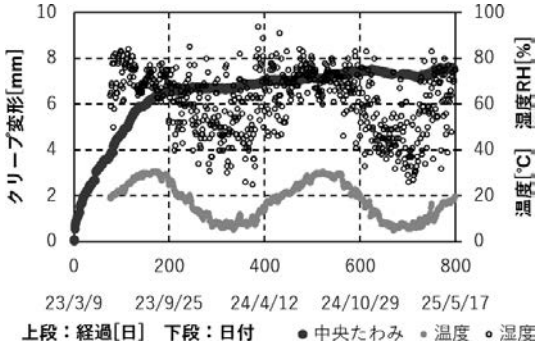
図－7 に試験体概要を示す。試験体は固定端支持条件及び片持ち条件の 2 種類とし，両試験体ともに試験体下部の木部は 150 mm 厚の CLT（Mx 60-5-5）とし，上部の RC スラブは 90 mm 厚で断面中央軸方向に異形鉄筋（D 13）を 7 本配置した。RC と木部との接合には鋼板と異形鉄筋を溶接した金物を用いており，CLT に設けたスリットに挿入し接着剤を充填させて固定した。



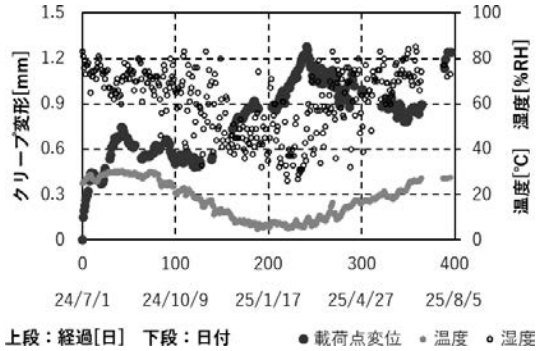
図－7　試験体概要［mm］

支持条件として RC スラブはスタブ上部と同時に打設したため一体化しているが，CLT はスタブから突き出たような形のコーベルに載せるのみとした。積載荷重は両端固定試験では 11.4 kN（2 kN/m²），片持ち試験では 10.3 kN（6 kN/m²）とした。なお，スラブコンクリートについては円柱圧縮試験により材齢の経過に伴う強度上昇は確認されていない。

図－8 に両端固定試験体，図－9 に片持ち試験体のたわみ及び温湿度の経時変化を示す。ここでは各日 12：00 の計測データをその日の計測値としている。両端固定試験体の中央たわみは初期変形 4.17 mm に対して載荷 796 日で 11.80 mm まで変形した。



図－8　両端固定試験体試験結果



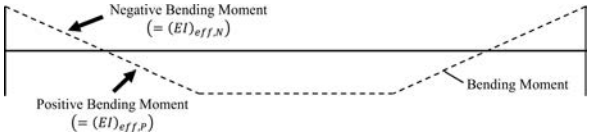
図－9　片持ち試験体試験結果

片持ち試験体の載荷点たわみは初期変形 1.43 mm に対して載荷 396 日で 2.75 mm まで変形したが，いまだにたわみの変動が大きく 2 次クリープ期への移行は明確には確認できていない。

長期的な性能の把握のためには今後もデータの蓄積が必要である。

Power 則を用いて算出した変形増大係数は，両端固定試験体では初期から全データを用いた場合 5.54，載荷 200 日以降のデータを用いた場合（2 次 Power 則）は 3.46 であった。片持ち試験体では全データを用いた場合 3.04 であった。

複合構造体（組立梁）の曲げ剛性の計算手法として FP Innovations 発行の「Design Guide for Timber-Concrete Composite Floors in Canada」には，固定端条件を考慮した理論式（図－**10** に



図－**10**　固定端支持条件におけるモーメント分布概略図

$$(EI)_{eff,P}=(EI)_c+(EI)_t+\gamma_c(EA)_c a_c^2 +\gamma_t(EA)_t a_t^2 \quad (式1)$$

$$(EI)_{eff,N}=(EI)_t+\gamma_s(EA)_s a_s^2 +\gamma_t(EA)_t a_t^2 \quad (式2)$$

$(EI)_{eff}$：有効曲げ剛性

E, A, I：各材ヤング率，断面積，断面 2 次モーメント

γ：接続剛性係数（接合金物のせん断剛性κより算出）

a：中立軸から各部材中央までの距離

下付き c, t, s：コンクリート，木材，鉄（鉄筋）

表－**2**　**FPI** 式による曲げ剛性の計算結果

試験体	計算値	実験値	計算 / 実験
両端固定	4.14	4.18	0.99
片持ち	3.62	3.58	1.01

示す（式 1），（式 2），以下，「FPI 式」という）が提案されている。この式を用いて，本試験体（両端固定試験体）への適用性を検討した。FPI 式の計算結果と実験値の比較を**表－2** に示す。両試験体ともに，計算値と実験値は非常に近い値を示しており，FPI 式によって概ね正確に曲げ剛性が計算できることを確認した。

現在，コンクリートのひび割れを考慮した TCC 床の長期性能予測のため，コンクリート，木材，接合金物の各材についてクリープ係数を用いた長期性能予測式を開発している。長期性能予測式の妥当性を検証し，TCC 床の変形増大係数が提案できると，TCC 床を RC 造や木造の床と同様に設計することが今後可能となる。

【参考文献】

1）　荒木康弘他，1 層を CLT 耐力壁構造とした枠組壁工法 4 層立面併用架構の構造性能その 2，2025 年度日本建築学会大会学術講演梗概集

2）　岩崎一優他　1 層を CLT 耐力壁構造とした枠組壁工法 4 層立面併用架構の構造性能その 3，2025 年度日本建築学会大会学術講演梗概集

3）　畑地健太郎他，CLT-RC 複合床の固定端支持条件での長期性能に関する研究　その 6　載荷後 796 日までの経過とひび割れによる曲げ剛性低下の定量的評価，2025 年度　日本建築学会中国支部研究報告集